

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.001

一种打磨机器人末端执行器的设计与分析*

顾寄南, 姜晓丹, 高国伟

(江苏大学 制造业信息化研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对发动机缸体后处理的打磨过程中存在的问题, 提出了一种 Y 型双工位的末端执行器的设计方案, 分析了其结构组成、工作原理, 设计了末端执行器的结构和砂轮尺寸, 在 PTC Creo Parametric 软件平台上建立了末端执行器的三维模型, 在 Simulate 中校核了其关键部件的刚度与强度, 在 RobotStudio 中规划了打磨路径, 并在相应的工作空间之内, 分析了其位姿及路径的可抵达性, 最后通过仿真实验检验了其规划的路径的合理性。分析结果表明: 该末端执行器结构稳定、设计合理, 机器人在工作区域的路径规划中, 各关节可抵达性为 100%, 且不与其他工件干涉, 能够实现对缸体端面 and 凸台面的自动化打磨任务; 可为其样机的研制提供理论依据, 为打磨路径的优化提供参考。

关键词: 工业机器人; 末端执行器; 双工位; 打磨

中图分类号: TH122; TH39; TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1085-05

Design and analysis of an end effector of a polishing robot

GU Ji-nan, JIANG Xiao-dan, GAO Guo-wei

(Manufacturing Informatization Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at grinding process of engine cylinder post processing of the problem, a design scheme of end effector of a Y type double station was put forward. The structure composition, working principle were analyzed and the end effector of the structure and size of grinding wheel were designed. The 3D model of the end effector was established on the PTC Creo Parametric software platform and the stiffness and strength of the key components were checked on the Simulate. Grinding path was planned in the RobotStudio, and in the corresponding work space, the position and the path of the arrival whether it is reasonable were analyzed by the simulation experiment. The results indicate that the structure of the end effector is stable and reasonable. It is reported that during the robot path planning in the work area, the joints can be arrived at for 100% without interfering other workpiece interference after optimization. It can realize the automation of cylinder surface and convex mesa grinding task and provide a theoretical basis for the prototype and the optimization of the polishing path.

Key words: industrial robot; end effector; double station grinding; polish

0 引言

目前, 在大多数铸造企业的铸件清理打磨过程中, 机械化和自动化的程度低。尤其是金属粉尘及手工打磨作业的体力消耗对员工的身心健康造成巨大的伤害。其

中, 发动机缸体铸件清理在铸件生产中至关重要, 如何提高缸体铸件清理工作效率, 尤其是去除缸体铸件凸台面的飞边毛刺工作的效率, 成为铸造工作者不断探索和迫切需要解决的问题^[1-2]。

经过查阅相关文献资料, 发现目前对缸体端面的打

收稿日期: 2017-03-03

基金项目: 江苏省科技成果转化项目 (BA2015026)

作者简介: 顾寄南 (1964-), 男, 江苏镇江人, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂产品建模与创新设计理论、智能机器人机构设计、视觉控制及分析仿真技术、基于网络的设计制造及制造资源智能集成理论、机械 CAD/CAE 及计算机图形学、虚拟机械设计 & 虚拟装配等方面的研究。E-mail: gjnan@ujs.edu.cn

磨主要使用双面磨削机和四面磨削机。

单工位缸体四面/两面磨削机的工件尺寸范围：

200 mm~1 200 mm，生产率：30 件/h，结构简单，生产率低，适合多品种、小批量生产。

双工位高效磨削机的工件尺寸范围：

200 mm~550 mm/450 mm~1 200 mm，生产率：70 件/h~100 件/h，结构较复杂，生产率高，适合大批量生产。

对缸体凸台面打磨采用人工的方式进行清理作业，生产效率极为低下。而利用工业机器人的多自由度柔性化加工的特点，可以满足发动机缸体铸件的打磨操作，实现替代人工对缸体铸件浇口残留及飞边进行打磨，从而大幅提高铸件打磨效率，且缸体铸件的打磨质量一致性非常好，同时可以降低工人劳动强度，显著改善生产环境，全面提高企业安全系数。

随着工业机器人的迅速普及和人力成本的不断上升，利用工业机器人打磨缸体铸件的技术将成为今后国内外铸件打磨技术中最重要的发展方向之一^[3-4]。

本文针对上述问题，根据发动机缸体后处理打磨要求，设计一种 Y 型双工位的末端执行器，实现对缸体 4 个端面及凸台面的打磨动作。

1 机器人打磨总体方案设计与分析

目前机器人自动打磨方案主要有两种，分别为：(1) 机器人抓取打磨工具打磨；(2) 机器人抓取铸件打磨。

前者通过机器人的末端执行器抓取打磨工具对工件进行打磨，其优点是：可以从工具库中选择和更换所需的工具；还可磨削铸件的内部表面^[5]。该方案适合于大中型铸件打磨。后者通过机器人的末端执行器抓取抛丸处理后的铸件打磨，其优点是：可以跟随很复杂的几何形状；在磨削后将铸件直接放到发货架上，容易实现现场流线化。该方案适合于中小型铸件的打磨。

该实验中需打磨的工件是发动机缸体（丰田四缸体），实验的机器人为 ABB-IRB6700 工业机器人，针对较为复杂孔洞类工件或是较为大型的工件的打磨，常使用机器人抓取打磨工具打磨工件。该实验中缸体符合上述条件，所以选用上述第一种方法进行自动化打磨操作。

机器人自动打磨单元由上下料轨道、机器人、排屑器、电气控制室等组成。机器人自动打磨单元的整体布局平面图如图 1 所示。

缸体铸件在上料位置经托盘定位后，由上料轨道输送至打磨工位打磨，打磨完成后由下料轨道输送至下料口。

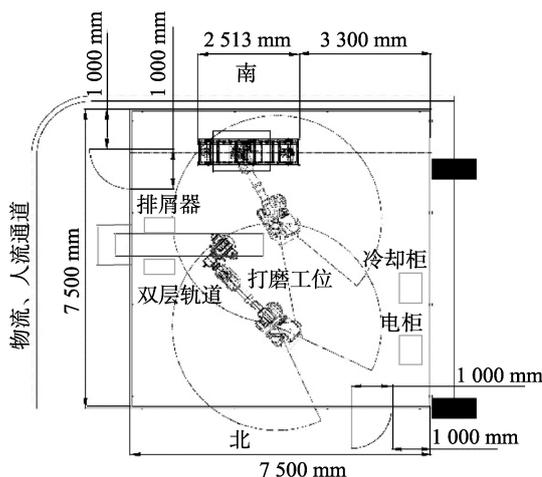


图 1 工艺方案布局

在缸体铸件的打磨作业中，打磨工具、打磨速率、打磨次数、打磨压力对表面加工质量有显著影响。而在这些因素中，打磨压力对加工效果的影响最大，而其他因素较易控制^[6]。

根据对铸件缸体打磨的需求，拟定选用 ABB-IRB6700-235 工业机器人，其额定载荷为 235 kg，工作范围为 2.65 m，手腕扭矩为 1 324 Nm。本文设计了一种 Y 型双工位末端执行器，配有力控装置，在完成打磨四个大端面的飞边、毛刺，及大大小小的凸台表面的毛刺的工作的同时，有效控制机器人打磨压力，提高打磨精度，减少刀具更换的次数。

2 末端执行器结构设计

根据上述方案的设计与分析，本文对该打磨机器人的末端执行器进行了详细的结构设计，并在 PTC Creo Parametric 软件平台上建立了构成该末端执行器的所有零件的三维 CAD 模型及装配模型，在 RobotStudio 中搭建打磨缸体所需的工作环境，如图 2 所示。

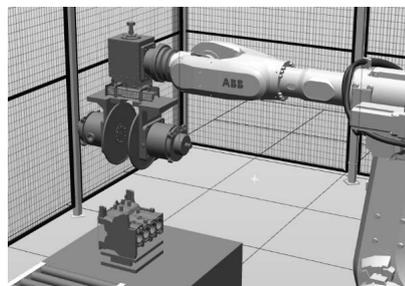


图 2 安装在机器人上的末端执行器

2.1 工作流程

本文设计的末端执行器的主要结构包括打磨模块及力控模块，如图 3 所示。

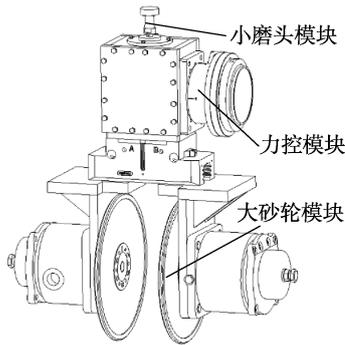


图 3 Y 型双工位末端执行器 CAD 模型

该实验设计的末端执行器打磨发动机缸体铸件的工作流程如图 4 所示。

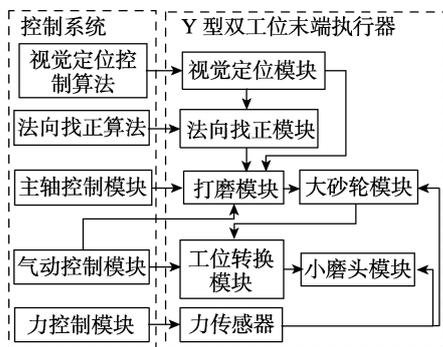


图 4 末端执行器工作流程

由工控机发出信号, 视觉定位模块工作, 对缸体铸件进行扫描, 传感器采集的数据由控制系统的视觉定位算法进行计算, 对打磨位置进行补偿^[7]; 机器人带动末端执行器到待打磨的初始位置 (Home 点), 法向检测模块进行工作, 传感器采集的数据由控制系统的法向找正算法进行计算并对机器人的位姿进行补偿; 机器人姿态调整后, 气动夹爪伸长到设定距离 d_1 , 控制系统发出信号, 打磨模块开始工作; 两个大砂轮同时打磨缸体前后两端面, 打磨完前后两端面后, 旋转台带动夹具和缸体, 旋转 90° , 气动夹爪伸长到设定距离 d_2 , 此时视觉定位模块对其进行二次补偿, 两个大砂轮开始工作, 打磨缸体的左右两端面, 4 个大端面打磨完成; 工位转换模块收到控制系统信号后, 机器人第六轴旋转 180° , 小磨头进行工作, 打磨凸台面; 打磨完成后, 机器人带动末端执行器回到 Home 点, 进行下一个缸体的打磨工作。

在打磨过程中, 力控模块始终工作, 根据力传感器采集的数据实时监控、调整, 使打磨力维持恒定。

2.2 打磨模块

打磨模块分为大砂轮模块和小磨头模块。其中大砂轮模块由两个金刚大砂轮、两个气动马达、气动夹爪、传动部件及连接件等组成, 通过气动夹爪的伸缩, 确定打磨的范围, 一次走刀打磨 2 个大端面, 同时配合旋转

台的转动, 实现对缸体 4 个端面的快速自动化打磨; 小磨头模块由小打磨头、气动马达、传动部件、连接件及壳体组成, 通过编写 RAPID 程序, 控制小磨头的打磨路径, 从而代替手工打磨小凸台面。

末端执行器的机械结构如图 5 所示。

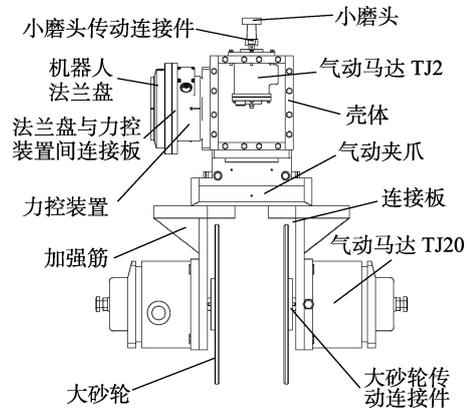


图 5 末端执行器机械结构

笔者根据缸体铸件的要求, 确定打磨工具及驱动元件。打磨工具的质量决定了其本身的使用寿命和铸件的打磨质量, 对铸件打磨的效率, 刀具更换频率及生产成本也有很大影响^[8-9]。

本研究的实验对象是缸体铸铁件, 选用金刚石磨具, 因其具有硬度高、抗压强度高、耐磨性好等特点, 且打磨效率高、精度高、铸件表面粗糙度好、砂轮消耗少、使用寿命长。

根据缸体需打磨面的大小, 设计大砂轮尺寸为: $\Phi 405 \text{ mm} \times t12 \text{ mm} \times \Phi 80 \text{ mm}$, 小磨头尺寸为: $\Phi 50 \text{ mm} \times t16.5 \text{ mm} \times L70 \text{ mm}$, 其中小磨头的最高线速度可达 $2\ 350 \text{ m/min}$, 转速 $13\ 500 \text{ r/min}$ 。

驱动元件的选择: 打磨电机应该选用转速高、发热小且散热性好的电机, 大砂轮直径为 405 mm , 大打磨轮对缸体端面的压力为 $N=10 \text{ N}$, 摩擦系数为 $u=0.5$, 摩擦力 $f=N \times u=10 \times 0.5=5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 力矩 $T_1=f \times r=5 \times 0.20=1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$, 小磨头直径为 50 mm , 力矩 $T_2=f \times r=5 \times 0.025=1.125 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。根据以上计算结果, 选择型号为 TJ20 的叶片式气马达驱动大砂轮, 其参数配置如表 1 所示。

表 1 TJ20 叶片式气马达主要参数

属性名称	属性值
型号	TJ20
额定功率/kW	14.71
工作压力/MPa	0.5~0.7
进排气管尺寸	G5/4
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 500
额定功率时耗气量/(m ³ ·min ⁻¹)	18
重量/kg	55

选择型号为 TJ2 的叶片式气马达驱动小磨头,其参数配置如表 2 所示。

表 2 TJ2 叶片式气马达主要参数

属性名称	属性值
型号	TJ2
额定功率/kW	1.471
工作压力/MPa	0.5~0.7
进排气管尺寸	G1/2
额定转速/(r·min ⁻¹)	4 000
额定功率时耗气量/(m ³ ·min ⁻¹)	2
外形尺寸	163×133×122
重量/kg	6

由缸体打磨需求分析可知,大端面的打磨宽度分别为 340 mm、275 mm,打磨采用直径为 405 mm 的金刚砂轮,所以气动爪夹最大行程该为 75 mm。

2.3 力控模块

力反馈控制是控制末端执行器上的加工工具与被加工表面之间接触时产生的正压力。这种控制有两个显著优点:(1)可以有效避免在加工过程中打磨工具脱离工件;(2)补偿因工具刚度变化及打磨头的磨损造成的误差^[10]。

为了使打磨过程中维持恒力,本研究在设计末端执行器时增加了力控模块,选择六轴力/力矩传感器,分别获取 x, y, z 这 3 个方向的力以及绕这 3 个轴的力矩,具体分布如图 6 所示。

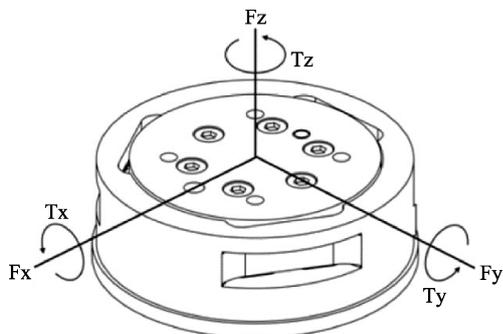


图 6 六轴力/力矩传感器力/力矩分布

该实验的力控模块选取 ATI 公司型号为:9105-TIF-OMEGA160-IP65 的六轴传感器,其主要参数如表 3 所示。

表 3 ATI 六轴力/力矩传感器量程与分辨率

轴	传感器	分辨率
F_x/N	+1 500	1/16
F_y/N	+1 500	1/16
F_z/N	+3 750	1/8
$T_x/N \cdot m$	+240	1/160
$T_y/N \cdot m$	+240	1/160
$T_z/N \cdot m$	+240	1/160

由 OMEGA160 力扭矩传感器、NETB 调制器构成力控模块,如图 7 所示。



图 7 力/力矩数据采集系统

3 末端执行器关键部件强度校核

末端执行器的强度和刚度直接影响机器人打磨的精度,甚至会对末端执行器元器件造成损坏,所以有必要对末端执行器结构件的强度与刚度进行分析,以保证机器人能顺利完成对缸体端面与凸台面的打磨任务。该末端执行器从总体布局上看,基本满足强度和刚度,选择末端执行器结构件受力较大、易发生变形的薄弱结构进行强度与刚度分析,从末端执行器的总体结构来看连接板受力较大且最易发生变形。下面就对其进行有限元分析校核。

末端执行器上的大砂轮,气马达 TJ20 与气动夹爪通过连接板连接,其结构的强度与刚度直接影响机器人的打磨精度。连接板材料选择 Q235,它的屈服强度为 235 MPa,弹性模量 $E=206 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$ 。

本研究利用 Creo 里的 Simulate 进行分析,确定连接板的约束和载荷,大砂轮和气马达 TJ20 的质量为 56 kg。根据经验公式可以得知,其作用在连接板的反作用力大约为 560 N,连接板通过上板的 2 个螺栓孔与气动夹爪固定,在这里笔者以 2 个螺栓孔为刚性单元约束点,提交运算得到米塞斯应力与位移云图,如图 8 所示。

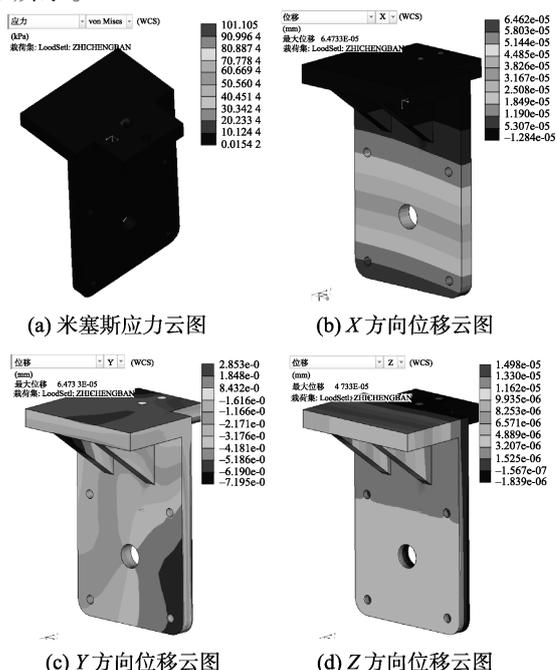


图 8 连接板米塞斯应力与位移云图

从分析结果图中可以看到,连接板所受最大应力为 10.12 MPa,远没有达到 Q235 的屈服强度 235 MPa,不会影响缸体打磨的精度。所以连接板的强度达到要求,不会发生塑性变形。连接板的 X、Y、Z 方向的最大位移量分别为 6.462 47e-05 mm、-7.195 300e-07 mm、1.498 012e-05 mm。而经查阅资料得知,缸体铸件后处理主要承力件的刚性位移一般不大于 0.3 mm。所以连接板的刚度足够,满足其设计要求。

4 仿真验证

在 Robotstudio 软件中对工作场景进行规划路径仿真实验。

首先,本研究将末端执行器三维模型导入 Robotstudio 中,为了使其能够自动安装到机器人法兰盘末端并能在工具末端自动生成工具坐标系,避免工具方面的仿真误差,先将该末端执行器创建成具有机器人工作站特性的工具(Tool)。其次,设定工具数据(Tdashalun)(Txiaomotou)、工件坐标(wobj0)及有效载荷。编写 RAPID 程序,创建端面及凸台面的打磨路径,如图 9 所示。

最后本研究进行仿真设定,对打磨路径进行仿真验证。

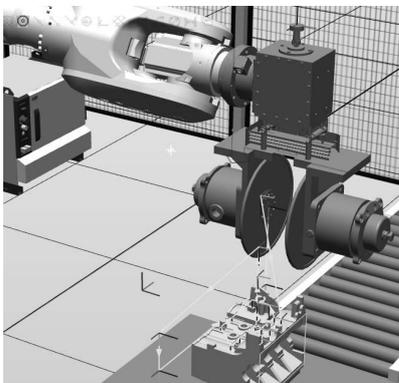


图 9 机器人打磨路径

通过以上步骤,仿真验证分析表明:各关节可抵达性为 100%,并未与周围环境发生干涉或碰撞。

5 结束语

本研究通过对打磨机器人末端执行器的设计和分析,得到以下结论:

(1) 确定了机器人打磨总体方案,根据其工作原理,设计了一种 Y 型双工位末端执行器用于打磨发动机缸体四个端面及凸台面;

(2) 校核了末端执行器结构中的关键部件的强度,根据分析结果确定该设计满足工作所需的强度;

(3) 仿真验证了该末端执行器能顺利完成四个端面和凸台面毛刺的清理打磨工作,不与周围环境产生干涉,有效地提高打磨效率,对于代替目前手工打磨凸台面毛刺的工作有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 杨军,熊亮,张跃华,等. 工业机器人在精铸件浇口及飞边打磨中的应用[J]. 金属加工: 热加工, 2015(23): 13-15.
- [2] 徐铮铮. 工业机器人在铸铁件打磨中的应用研究[J]. 热加工工艺, 2016(23): 106-108.
- [3] 李玉青,吴殿杰. 铸件后处理磨削工艺装备的应用现状[J]. 铸造设备与工艺, 2014(2): 21-23.
- [4] 张艳霞. 基于力觉和视觉的机械手伺服控制研究[D]. 洛阳: 河南科技大学信息工程学院, 2012.
- [5] 陈跃程,刘伟. 铸件清理打磨自动化技术及其应用[J]. 铸造设备与工艺, 2015(5): 1-6.
- [6] 叶永龙. 基于机器人的玻璃自动打磨系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江理工大学机械与自动控制学院, 2013.
- [7] 李鹏程,田威,廖文和. 基于双机器人装配系统的多功能末端执行器设计[J]. 机电一体化, 2014(5): 62-66, 77.
- [8] 姚立权. 打磨机器人机电系统设计与研究[D]. 沈阳: 东北大学机械工程与自动化学院, 2008.
- [9] 黄祖良,邓琛,张琴舜. 体感交互式拟人手臂机器人[J]. 轻工机械, 2016, 34(1): 5-8.
- [10] 张庆伟,韩利利,徐方,等. 基于打磨机器人的力/位混合控制策略研究[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(7): 884-887.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

顾寄南,姜晓丹,高国伟. 一种打磨机器人末端执行器的设计与分析[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1085-1089.

GU Ji-nan, JIANG Xiao-dan, GAO Guo-wei. Design and analysis of an end effector of a polishing robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1085-1089.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>